

## 要 約

河川の水位や流量を把握することは、治水・利水・水環境といった様々な観点において極めて重要である。とりわけ、洪水時の水位や流量は、即時の避難判断・指示、洪水調節施設の操作判断の指標となることや、洪水後の外力評価や現状の流下能力・治水能力評価と、それに基づいた適切かつ効率的な対策検討の基礎資料となるため、重要度は極めて高い。また、洪水時の水位・流量データは当該洪水中を除いて計測不可能であり、観測を確実に遂行することが要求される。このため、国土交通省や地方自治体などの河川管理者は、水位観測所や水位流量観測所を約 10～20km 間隔で河川内に設置し、平常時から洪水時の一連の水位・流量観測を行っている。まず、水位は、観測員による量水標の目視だけでなく、標高が既知の圧力センサーによる水圧計測値、水面に向けられた電波・超音波送受信機からの送受信時間差などから直接的かつ無人・自動連続で計測が可能であるため、水位計による自動連続・リアルタイム観測が一般的である。一方、流量は直接計測が困難であるため、河道横断面形状と水位、流速から間接的に求める方法がとられる。このうち、流速データは電磁流速計や浮子を用いた有人観測による計測が一般的に行われるが、その観測値は河道横断面内の離散的な「点」データに限定されるため、「面」流速に内外挿する操作を施す必要があり、標準的な高水流量観測手法である浮子測法では、更正係数や区分断面内流速一様の仮定が適用される。さらに、河川管理者は、十分に時間的余裕を確保して避難判断・指示を行うために、特定の水位観測所を対象に洪水時の水位予測を行っている。現行の水位予測システムは、河川単位で整備が進められており、その多くは予測雨量データを入力値とする集中型流出計算モデルを採用している。

しかしながら、近年、気候変動に伴う豪雨規模の増大によって、従来の水位・流量観測手法では計測が困難となる事例が頻発化する傾向にあり、さらに、流量観測請負業者の減少や縮小によって流量観測業務そのものの継続が危ぶまれている。また、洪水の越流・破堤現象は水位観測・予測地点近傍で発生するとは限らず、限定的な位置での水位観測・予測では洪水氾濫危険度・逼迫度の把握には不十分である。

本研究では、洪水氾濫リスクや外力のモニタリング・予測を高度化するために、前述の空間的に疎な観測データを河川流計算に同化することにより、低コスト・高効率・高精度な新たな河川流量観測法・河川水位縦断分布推定法としての力学的内外挿法（Dynamic

Interpolation and EXtrapolation method, DIEX 法) を提案し、現地実証試験や室内実験、数値実験によりその有用性を検証することを目的とする。まず、流量観測の精度や効率を大幅に改善するために、H-ADCP 向けに特化していた河川流速の DIEX 法をあらゆる流速データに適用可能となるように汎用化した。その結果、流速データ数を半減させても流量観測精度が保持されることが示された。一方で、近年頻発している極端豪雨による洪水では、接触型の流速計測機器が流失するリスクが高く、水位・流量を非接触計測可能なモニタリング技術の確立が急務であった。そこで、河川沿いに多数整備されている CCTV カメラの撮影画像に対して画像解析を施すことで水位・表面流速を取得し、DIEX 法により高精度の流量を算定する、という自動連続モニタリングシステムを構築した。さらに、河川全体の洪水氾濫リスクを把握するために、DIEX 法概念を水位データ同化に拡張し、洪水予測用力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method for Flood prediction, DIEX-Flood) を開発した。DIEX-Flood の有用性を評価するために、江戸川・鬼怒川の複数出水に本手法を適用し、水位内外挿・予測の精度を評価した。最後に、内水氾濫リスクの評価を可能とするために、DIEX 法および DIEX-Flood を管路流計算に対応させることで、下水管内の流量・水位モニタリング手法を提案した。本手法の流量算定精度や水位予測精度は、室内実験、数値実験により検討した。以下、各章の概要を示す。

**第 1 章**では、現行の流量観測手法や洪水予測手法の基本概念と、豪雨の頻発傾向により顕在化してきた課題を示し、本研究の目的の位置づけを明確にする。さらに、既往の研究と本研究で提案する流量用及び洪水予測用 DIEX 法に関して示す。

**第 2 章**では、従来、H-ADCP 計測による「線」流速データから「面」流速データ・流量を算出するために開発されてきた DIEX 法を様々な流速計測技術に適用可能となるようにデータ同化アルゴリズムを改良し、「点」流速データから「面」流速データ・流量を算出可能とした。本手法の有効性を現地観測データに基づいて検証した。新たに開発した汎用 DIEX 法モデルでは、浮子・電磁流速計・電波流速計・画像解析法といった種々の流速計の計測データを取り込むことが可能となり、低水～高水、緩流域～急流域までを含めた広範な環境下での高精度の「面」流速・流量算定が可能であることを示した。さらに、流速観測データの空間解像度に対する流量算定精度を評価したところ、従来手法では観測空間解像度に流量算出精度が大きく依存したが、本手法では観測空間解像度に依存せず高い流量算出精度を保持できることを示した。これより、本手法は、観測機器数や地点数を減ら

しながら高精度の流量算出が可能であり、さらには、観測機器の不具合などによって一部の流速データを欠測した場合でも流量算出が可能であることから、流量観測の高効率化・低コスト化・高精度化に加えて、確実性・安定性の向上に寄与することを明らかにした。

**第3章**では、第2章で開発した汎用 DIEX 法モデルと、河川沿いに多数整備されている CCTV カメラ撮影や近年急速に発達・普及が進む画像解析法を組み合わせた超過洪水対応型の無人・自動連続的な河川水位・流量観測システムを提案し、室内実験・現地実証試験により有効性を検証した。室内実験では、照度や風向風速といった外部環境が本システムの計測精度等に与える影響を定量評価するとともに、流速計測異常データの棄却法を提案した。現地実証試験では、河川向けの画像解析システムとしては前例のない約1年間にわたる長期連続観測を実施した。長期連続観測により、晴天・雨天、昼間帯・夜間帯、順風・無風・逆風、逆光など様々な環境条件下での撮影特性を把握し、測光制御等の改良を施した。また、室内実験で提案した流速異常値棄却法に加えて、DIEX 法に基づく流速異常値棄却法、さらには風向風速補正を導入することで、本システムの流速分布・流量推定値は検証用 ADCP 観測値と良好に一致し、本システムはロバストかつ高精度に高水流量を観測可能であることを示した。

**第4章**では、流量算出用 DIEX 法のデータ同化アルゴリズムを水位データ同化手法に拡張した DIEX-Flood を開発した。DIEX-Flood では、「点」水位観測データをマンニングの粗度係数  $n$  や付加項  $F_a$  を介して一次元不定流計算に同化することで、運動方程式と連続式を満足する「線」水位データを算出可能であり、現況再現された「線」水位データを初期値とする一次元不定流計算により、将来時刻の「線」水位予測を行う。本手法の有効性を検討するために、理想的な仮想河川流データや江戸川における中規模出水データ、鬼怒川における大規模出水データに本手法を適用した。その結果、DIEX-Flood により、「点」水位データは滑らかな「点」水位データに内外挿され、その最高値の縦断分布は痕跡水位縦断分布と良好に一致することが示された。さらに、従来手法における洪水予測地点において従来手法より高精度の将来予測が可能であるとともに、「線」水位予測により河川全体を対象とする越水・溢水の予測が可能であることを示した。一方で、高精度の将来「線」水位予測を行うためには、境界条件予測誤差の影響を軽減するために河道モデル延長を極力長めにするとともに、付加項  $F_a$  の時空間変化を適切に評価・予測することが重要であることが示唆された。

**第5章**では、前章までに河川流向けに構築・検証した流量用・水位予測用 DIEX 法を管

路流向けに拡張することで、下水道流量観測システムと内水氾濫危険度評価モデルを新たに開発した。流量用 **DIEX** 法モデルの有効性を検証するために、室内実験を実施したところ、開水路～遷移～圧力状態のいずれでも **V-ADCP** による流速計測データを精度良く同化し、流量算出が可能であることを示した。また、水位予測用 **DIEX** 法モデルの有効性の評価のために、仮想的な管路流データからデータ同化用の「点」水位データを作成し、本手法の水位縦断分布の推定精度を検証した。その結果、水位データ同化によって開水路状態～遷移状態～圧力状態のいずれでも「線」水位データの推定が可能であった。このように、河川向けに開発してきた **DIEX** 法および **DIEX-Flood** の下水道管路への基本的な性能が示された。

**第 6 章**では、本研究で得られた知見をまとめ、既往最大規模を超える洪水にも対応可能かつ持続可能な高効率・低コスト・高精度の流量観測システムおよび洪水予測システムを提案した。